

Válasz
Dr. Zobory István professzor emeritusz, a műszaki tudomány
doktora
bírálatára

Először is köszönöm Dr. Zobory István minden részletre kiterjedő, alapos bírálói munkáját. A bírálatban megfogalmazott kritikai észrevételekre/megjegyzésekre előfordulási sorrendjükben válaszolok.

1, *„Az értekezés angol nyelven íródott. Arra vonatkozó dokumentum nem érkezett, hogy az MTA engedélyezte az értekezés angol nyelven való beadását, azonban feltételezem, hogy az MTA Doktori Tanácsának adminisztrációja nem küldte volna ki az értekezést bírálatra, ha ez a feltétel nem teljesült volna. Ezzel kapcsolatban azonban a jelen bíráló nem leplezheti azon véleményét, miszerint a magyar állampolgároknak a Magyar Tudományos Akadémiához benyújtott értekezéseinek alapesetben magyar nyelven kellene íródniuk, tekintettel arra, hogy az Akadémiánk küldetésének egyik fontos pontja a magyar nyelv ápolása, és ennek szellemében törekedni kell a magyar műszaki nyelv fejlesztésére és kiteljesítésére!”*

Az értekezés angol nyelven történő benyújtásához szükséges osztályelnöki engedélyt az MTA doktori eljáráshoz kapcsolódó pályázati anyagom tartalmazza. A magyar nyelv ápolását, fejlesztését és kiteljesítését magam is fontosnak érzem, ezért a kutatómunkám során mindig arra törekedtem, hogy az eredményeimet lehetőség szerint magyar nyelvű folyóiratokban, konferencia kiadványokban is megjelentessem (lásd magyar nyelvű publikációk listája).

2, *„Az értekezés terjedelméről azonban azt meg kell jegyezni, hogy az egy oldalon átlagosan 50 soros és soronként 90 leütéses tükör alkalmazása (oldalanként 4500 leütés). A szokásos 1600 leütéses „nagy oldalt” figyelembe véve az értekezés valóságos terjedelme mintegy 280 oldal, ami az alkalmazott kicsi betűmérettel együtt a bírálat elkészítését nem segítette.”*

Az értekezésemet az MTA Műszaki Tudományok Osztályának hatályos doktori követelményrendszerében található doktori műre vonatkozó javaslatoknak (*„Az értekezés érdemi fejezeteinek terjedelme ne haladja meg a 100 oldalt. Ne használjon 12 pontnál kisebb betűtípusokat, túl keskeny margókat, a képletek szellősen és áttekinthetően legyenek szedve, az ábrák és felirataik szerkezete, mérete segítse a lényeges gondolatok gyors megértését.”*) megfelelően igyekeztem elkészíteni. A Bíráló által említett szokásos 1600 leütéses „nagy oldalról” az idézett követelményrendszer nem tesz említést.

3, *A gumi-szerű anyagok „száraz és kent felületi viszonyok melletti érintkezése esetén a különböző érdességi viszonyok jelenlétében kialakuló csúszósúrlódásának sajátosságainak numerikus modellezése az értekezés 100 oldalas érdemi részéből 74 oldalt tesz ki. Ez a témaválasztás egybehangzik az értekezés címével és önmagában is elegendő lett volna egy tartalmas akadémiai doktori értekezéshez. A jelölt azonban értekezésében 26 oldal terjedelemben behatolt a siló tornyok és surrantók ömlesztett anyagáramlási folyamatának modellezési kérdésebe is. Valójában ez a témakör önmagában is alkalmas lett volna az akadémiai doktori disszertációhoz.”*

A viszkoelasztikus szemcsékkel töltött siló tornyokkal és surrantókkal kapcsolatos kutatásaim elsődleges célja a töltési és ürítési folyamat során fellépő terhelések - különös tekintettel a

dolgozat címében is említett száraz (fal)súrlódás nagyságára - numerikus szimulációval való meghatározása volt. A kitűzött cél elérése ugyanakkor szükségessé tette az ömlesztett anyag áramlási folyamatának modellezését is. Szemben az említett 74 oldal terjedelemben tárgyalt, kontinuum mechanikára épülő megközelítéssel, a falsúrlódás meghatározására diszkrét modellezési megközelítést használtam. Mindamellett, hogy a viszkoelasztikus anyagi viselkedés és a száraz súrlódás numerikus előrejelzése közvetlen kapcsolatot jelent a két téma között, a diszkrét modellezési megközelítéssel elért eredményeim jelentős, napjainkig tartó nemzetközi szakmai visszhangja sarkalt arra, hogy az értekezésemben a silók és surrantók problémakörére is kitérjek.

4, *„Az értekezés bírálatának megkezdésekor azonnal kibukott a jelölések jegyzékének sajnálatos hiánya, pedig annak tartalma sokban segítette volna a bírálati munkát”.*

A dolgozatom valóban nem tartalmaz jelölésjegyzéket, ugyanakkor nagyon figyeltem arra, hogy a használt jelöléseket első előfordulási helyükön definiáljam. Ugyanakkor, az általam használt logika bírálói szempontból megfogalmazott kritikáját elfogadom.

5, *„Nem segítette a bírálati munkát a nagyszámú „kívülre hivatkozás” megtapasztalása sem, miszerint számos helyen a szakirodalmi források egzakt megadását nem kíséri olyan mértékű tartalmi magyarázat, hogy a hivatkozott állítás, összefüggés helyessége kétség nélkül (könyvtárba vonulás nélkül) elfogadhatónak ítéltető. Sokszor segített a bírálónak az elmaradt információ után az interneten történő tájékozódás.”*

Az MTA Műszaki Tudományok Osztályának hatályos doktori követelményrendszerében megfogalmazott terjedelmi korlát, valamint a dolgozatomban bemutatásra kerülő kutatási témák összetettsége és eltérő tudományterületekre (mechanika, tribológia, anyagtudomány, áramlástan, számítógépes grafika, stb.) épülése nem tette lehetővé a „kívülre hivatkozás” gyakorlatának mellőzését. Az irodalomból a forrásmunka egyértelmű megadása mellett átvett állítások, összefüggések helyességének megítéléséhez a dolgozatomban található rövid magyarázatok/elemzések csak adalékul szolgálnak, ezáltal nem helyettesíthetik teljes egészében az eredeti, sokszor igen terjedelmes, forrásmunkákban található levezetéseket, magyarázatokat.

6, *„Kiváltképp az értekezés későbbi tanulmányozóira gondolva lett volna helyes a kontaktmechanikai feladat olyan fogalmazása, amelyben a kontaktfelületi trakciókkal kapcsolatos súrlódási munka és a súrlódókapcsolatban lévő testekben alapvetően a kontaktfelületi érdekességek környezetében kialakuló deformációkkal kapcsolatos energia disszipáció alapvetően megkülönböztetésre kerülnek.”*

A viszkoelasztikus testek súrlódásával foglalkozó kutatói közösségen belül uralkodó, és a dolgozatomban is hangsúlyozott felfogás értelmében, a súrlódási erő egyidejűleg fellépő, azonban egymástól nem független fizikai folyamatok következménye. Ez az jelenti, hogy például a valós érintkezési tartományon fellépő adhéziós kapcsolatok elnyírásához szükséges munka, mint kontaktfelületi trakciókkal kapcsolatos súrlódási munka, nem független a viszkoelasztikus test makro és mikro (kontaktfelületi érdekességek környezetében kialakuló) deformációjával kapcsolatban lévő, az anyag belső súrlódásából származó energia disszipációtól. A súrlódási erőért felelős fizikai jelenségek között fennálló kölcsönhatások miatt, nem tartottam helyesnek élesen megkülönböztetni a különböző fizikai folyamatokból származó súrlódási munkákat/energia disszipációkat.

Tételes bírálói megjegyzések és kérdések

1. „A 14. oldalon f. a.18. sorban a Campbell hivatkozással kapcsolatos részhez kívánatos lett volna ábrával illusztrálni a behozott fogalmakat.”

Egyetértek a Bírálóval. A részletes szöveges magyarázat kiegészíthető lett volna egy szemléletes magyarázó ábrával.

2. „A 15. oldalon. a.15. sorban a frictional shear stress értelmezése ábra nélkül aggályos.”

A súrlódási erő adhéziós összetevőjének bemutatásával foglalkozó alfejezetben szereplő „frictional shear stress” a valós érintkezési tartomány mentén kialakuló adhéziós kapcsolatok nyírószilárdságát (egységnyi érintkezési tartományra jutó, adhézióból származó súrlódási erő) jelöli. A dolgozatomban kapcsolódó részének fő célja a súrlódási erő viszkoelasztikus (hiszterézis) összetevőjének numerikus előrejelzése, ezért a magyarázó ábrák erre az összetevőre koncentrálnak. Mindezek ellenére egyetértek a Bírálóval. A kifogásolt fogalommal kapcsolatban is készíthettem volna egy megértést támogató ábrát.

3. „A 15. oldalon a. 3. sorban a critical sliding velocity létezéséről és kimutatási módjáról nem szerepel magyarázat.”

A „critical sliding velocity” létezésével és annak kimutatási módjával Le Gal és Klüppel tanulmányai [Le Gal, A.; Yang, X.; Klüppel, M.: „Evaluation of sliding friction and contact mechanics of elastomers based on dynamic-mechanical analysis”, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 123, (2005); Le Gal, A.; Klüppel, M.: „Investigation and modelling of adhesion friction on rough surfaces”, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, Juni 2006, pp. 308-315, (2006)] foglalkoznak. A meghatározási módszer alapgondolata az, hogy a száraz és kent körülmények között, különböző sebességek mellett mért súrlódási tényezők különbsége, jó közelítésként, a súrlódási tényező adhéziós összetevőjével egyezik meg. A kritikus csúszási sebesség mérési eredmények sorára épülő meghatározásával magam is foglalkoztam a dolgozatomban említett EU6-os kutatási projekt keretében, de az abból készített angol nyelvű beszámoló csak a kutatási projekt résztvevői számára elérhető formában jelent meg.

4. „A 16. oldalon f. 3...8 sorokban az adhesion component of friction fogalmának egyértelmű fizikai tartalmáról nem kapunk komprehenzív tájékoztatást.”

A 2. sorszámú kritikai észrevételre adott fenti válaszom értelmében, a súrlódási erő adhéziós összetevője, a valós érintkezési tartomány mentén kialakuló szilárd test érintkezés során fellépő adhéziós kapcsolatok elnyírásához szükséges tangenciális erő, ahol a nyírószilárdság az egymással érintkező felületek relatív sebességének, az érintkezési nyomásnak és a hőmérsékletnek a függvénye.

5. „A 16. oldalon a 4.3 ábrával bemutatott standard solid model esetén kérdéses a sorbakapcsolt lineáris rugó és lineáris csillapító rendszer eredő dinamikájának a kezelése. Milyen módszert használt a Jelölt?”

Az említett szakirodalomból származó ábra (vonallal mentén mért érdesség profil által gerjesztett standard solid modell) a dolgozatomban csak a súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének szemléltetésére szolgál. Az általam vizsgált, többek között a valós anyagi

viselkedés figyelembe vételére is alkalmas matematikai modellek numerikus megoldására minden esetben a végeselem módszert használtam.

6. „A 17. oldalon f. 9 sorban belép a különböző hossz-skálához tartozó súrlódási tényezők additivitása. Az egyes skálákhoz tartozó profilok Fourier sorokkal léphetnek be. Ezzel szemben Nettingsmeier és Wriggers csupán egyetlen szinusz hullámmal kezeli a profilt. Elégséges lehet az ilyen leegyszerűsített kezelés?”

Nettingsmeier és Wriggers 2004-es modelljével kapcsolatban joggal merül fel a fejlesztésre vonatkozó igény. A modell továbbfejlesztésére irányuló erőfeszítések eredményeként kidolgozott modellek ([129] és [135]) már lehetővé teszik a súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének végeselemes előrejelzését a felületi érdesség néhány szintjének egyidejű figyelembe vételével, de kizárólag 2D-ben (2D-s végeselem modellek).

7. „Végül is mi a mérlege Nguyen vizsgálatainak összevetve a gömbszerű és a szabálytalan (éles csúcsos) érdesség alakok esetét? Milyen modellt ajánl a jelölt az egyenetlenség (érdesség) profilok egzakt kezelésére? (18. old. első bekezd)”

Nguyen és társai [26] kizárólag merev, gömb alakú érdesség csúcsokból álló felületek által gerjesztett viszkoelasztikus súrlódás kísérleti és elméleti vizsgálatával foglalkoztak. Vizsgálataik nem terjedtek ki a szabálytalan (éles csúcsos) érdesség alakokra. Tapasztalataim szerint az érdesség profilok megfelelő pontosságú kezelésére a több mérettartományra kiterjedő, az érdesség csúcsok geometriáját jól közelítő, ún. többszintű modellek javasolhatók.

8. „A viszko-elasztikus energiavesztesség meghatározására alkalmazott végeselemes eljárás során a felületek érintkezésével kapcsolatos súrlódási trakciókat figyelmen kívül hagyja a jelölt (2. old. a. 20.sor). Eljárása helyes, azonban készült-e szimuláció az elhagyott szokásos súrlódási trakciók hatásának figyelembe vételével?”

Igen, készültek olyan szimulációk, ahol a szokásos, felületek érintkezésével kapcsolatos súrlódási trakciókat egy előírt, érintkező felületekhez rendelt súrlódási tényezővel vettük figyelembe. A szimulációk tanúsága szerint az ilyen esetekben az eredő súrlódási tényező az előírt és a viszkoelasztikus súrlódási összetevőre jellemző súrlódási tényező összegeként állt elő.

9. „Hogyan érti a jelölt azt, hogy a gumi merevebb lesz nagyobb csúszási sebesség estén? (21. old. a. 1.sor)”

A csúszási sebesség növekedésével az alakváltozás sebessége növekszik, ami nagyobb gerjesztési frekvenciaként értelmezhető. Növekvő gerjesztési frekvencia mellett viszont a gumi merevsége is növekszik.

10. „A Maxwell-féle anyagmodell többször belép a képbe. Felmerül a kérdés, hogy milyen módon kezeli a jelölt a modellben a sorbakapcsolt rugó és csillapító elem együttes dinamikai viselkedését. A kérdés sokszorosan merül fel a különböző, 15...40 párhuzamos ággal általánosított Maxwell modell kezelését illetően. (22. old. a. 5. sor) Mi itt a ViscoData szerepe? (23. old. a. 5. sor)”

Az általánosított Maxwell-modell kezelésére az MSC.Marc végeselemes programrendszert használtam, ami hasonlóan az összes nagyobb végeselem programhoz, külön felhasználói

felületet biztosít a modell paramétereinek megadásához. A ViscoData az általánosított Maxwell-modell (párhuzamosan kapcsolt Maxwell-elemek) rugó és csillapítás paramétereinek meghatározására kifejlesztett, genetikus algoritmus használatára épülő szoftver. A kutatómunkám során a szoftver még az ingyenesen letölthető szoftverek közé tartozott.

11. „A rejtélyes „measured master curve” pontos értelmezése szükséges. Mi a független változó, mi a függő változó, mik a konstans paraméterek, ki és hol végezte a méréseket? Mekkora volt a mérés hibája? (22. old. a. 2. sor).”

A méréssel meghatározott tárolási modulus mestergörbe a gumi tárolási modulusának változását szemlélteti a gerjesztési frekvencia függvényében egy adott hőmérsékleten. A független változó a frekvencia, a függő változó pedig az anyag tárolási modulusa. A paramétereket az ágak számával megegyező darabszámú relaxációs idők ($\tau_i = \eta_i / E_i$) és relatív rugalmassági modulusok ($e_i = E_i / E_0$, ahol E_0 az anyag üveges modulusát jelöli) jelentik. A méréseket a BME, Gép- és Terméktervezés Tanszék egyik doktorandusza végezte el a Kaiserslauterni Egyetem, Kompozit Anyagok Intézetében a dolgozat elején említett EU 6-os Kristal projekt keretében. Az általunk használt görbe három mérés átlagát szemlélteti.

12. „A 24. old. a. 5. sorban említett ”counter surface” anyagi minősége nem került megadásra. Miképpen (milyen eljárással) készült a szinuszos érintkezési profil?”

Az ellenfelület ideálisan merev testként került megadásra ezzel is jelentősen csökkentve a végeelem modellhez szükséges elemek számát. Az ellenfelület megadására több lehetőség közül választhatunk. A kérdésben szereplő esetben, az ellenfelület, az ellenfelület CAD modelljének importálásával került létrehozásra.

13. „Mi volt a Maxwell-modellbeli paramétereknek (véltetően merevségi, csillapítási tényező/relaxációs idő paraméterek) kézzel való beállításának (manually adjusted) konkrét módszere, és hogyan (milyen fizikai elv érvényesülése mellett) függnek össze a paraméter értékek? Csupán pl. egy legkisebb négyzetes közelítés alapján? Mekkora lehet a közelítés hibája? (26. old. a. 6. sor)”

A paraméterek utólagos manuális módosítása során a ViscoData szoftver által előállított paramétersort használtam kiindulásként. Az utólagos módosításra azért volt szükség, mert az említett szoftver a modell paramétereit a mért tárolási modulus mestergörbére történő görbeillesztésből határozza meg. Az így előállított anyagmodell ugyan jól közelíti a mért tárolási modulus mestergörbét, azonban a mért és szimulált veszteségi tényező görbék közti egyezés az esetek döntő részében már korántsem ilyen jó (lásd. C1-C4 ábrák). Az alulbecsült veszteségi tényező, becsült viszkoelasztikus súrlódási tényezőre gyakorolt hatásának vizsgálatára megváltoztattam a ViscoData által szolgáltatott relatív rugalmassági modulusok értékét. A paraméterek utólagos módosítását vezérlő feltétel értelmében a különálló rugó és a vele párhuzamosan kapcsolt n darab Maxwell-elem relatív rugalmassági modulusának az összege eggyel egyenlő. A várható viszkoelasztikus súrlódási erő összetevő nagysága szempontjából a közelítés teljes frekvencia tartományra vonatkozó hibája helyett, a feladat szempontjából fontos viszonylag szűk frekvencia tartományra vonatkozó hibát érdemes szemlélni. A módosított paramétersor által előállított közelítés hibájának becslésére, a kirajzoltatott, mért és szimulált anyagi viselkedés feladat szempontjából fontos frekvencia tartományon belüli összehasonlításán keresztül került sor. A közelítés hibája, a paraméterek utólagos módosítása következtében, a veszteségi tényező tekintetében csökken, míg a tárolási modulus tekintetében nő.

14, „Kérem pontosan megadni, mit ért Denny az angol szöveg szerinti „adhesion component of rubber friction” kifejezéssel megjelölt jelenségen. Magyarul itt az anyagpár között csúszásmentes érintkezési felületén kialakuló, felületre merőleges intermolekuláris vonzerőre lehet gondolni, vagy a felületi normális trakció mellett kialakuló csúszó-súrlódási trakcióra? (39. old. a. 6. sor)”

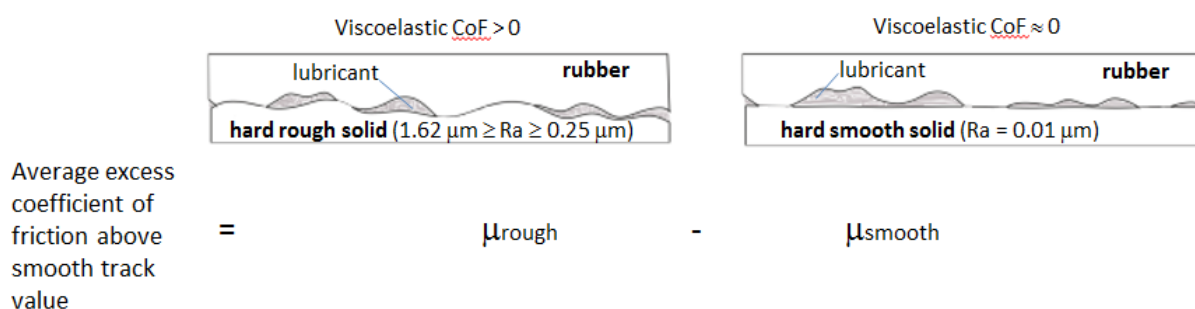
Denny „adhesion component of rubber friction” kifejezése a felületi normális trakció mellett kialakuló csúszó-súrlódási trakciót jelöli.

15, „A 40. old. f. 7. sorban a „frictional shear stress” milyen pont környezetében kialakuló nyírófeszültséget jelent? A szilárd test súrlódó partner csúszófelületéhez közeli, de már a szilárd testben lévő pontbeli mechanikai feszültségről van szó, vagy pedig a kenőanyag rétegek egymáson történő (remény szerint lamináris) elcsúszásával kapcsolatos sebességi gradiens függő csúsztatófeszültség szerepel?”

A „frictional shear stress” a súrlódási erő és a névleges érintkezési tartomány hányadosaként átlagos nyírófeszültséget jelöl. Az érintkezési és kenési viszonyok a névleges érintkezési tartományon belül pontról-pontra változhatnak, ezért a kialakuló lokális nyírófeszültség nagysága ettől eltérő és vagy a szilárd test felületén, vagy a kenőanyagban alakul ki. Amennyiben a határréteg átszakad (megszakad a határréteg folytonossága), a lokális szilárd test érintkezés következtében fellépő nyírófeszültség a szilárd test felületén alakul ki. Kenőanyag jelenlétében a nyírófeszültség vagy a kenőanyag belsejében alakul ki, miközben a kenőanyag rétegek elcsúsznak egymáson, vagy a kenőanyag molekulák és a szilárd test határfelületén alakul ki miközben a határréteg és a szilárd test közti kapcsolat elnyíródik.

16, „Kérem ábra segítségével értelmezni a Denny-től hivatkozott „average excess coefficient” fogalmat.(41. old. a. 14. sor)”

A Denny-től hivatkozott „average excess coefficient” kifejezés teljes alakja a következő: „average excess coefficient of friction above smooth track value”.



17, „A deformábilis test érdes felület merev síkkal vizsgált érintkezési feladatát a 4.35 ábra kívánja megjeleníteni. Nem került képletszerű megadással (pl. integrál-átlag) értelmezésre a „mean surface hight” azaz a közepes felület (profil) magasság. Milyen középérték képzés szerepel? Ugyancsak nincs szigorúan definiálva a „mean summit hight” azaz a közepes csúcs magasság. Ezek hiányában a d „separation” egzakt értelmezése nem valósul meg.”

A „Mean surface height”, azaz a közepes profil magasság számítási összefüggése a következő: $m = \frac{1}{L} \int_0^L z^* dx$, ahol z^* az érdes felület adott helyen mért referencia vonalhoz (mérési bázishoz) viszonyított magassági koordinátája, x a vízszintes koordináta tengely, L pedig a mérési hossz (diszkrét formában $m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^*$, ahol N a mérési pontok számát jelöli).

A „Mean summit height”, azaz a közepes csúcsmagasság számítási összefüggése a következő: $\bar{z} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M z_{pj}$, ahol z_{pj} a j -edik csúcs közepes profil magasságtól mért magassági koordinátája, M pedig a csúcsok száma.

18, „Az, hogy az 53. old. f. 18. sorban a Jelölt valószínűségi sűrűségfüggvényt említ arra enged következtetni, hogy a háttérben értelmezve van egy valószínűségi mező és azon egy sztochasztikus folyamat, amely utóbbi leírja az érdeségnek a hosszkoordináta menti alakulását. A kérdés valószínűségsszámítási bevezetése azonban nem tűnik elő, és nem tudunk meg semmit az érdeség-függvény statisztikailag bizonyított vagy feltételezett valószínűségi szerkezetéről (pl. gyenge stacionaritás?). Ilyen helyzetben a szerepeltetett $\Phi(z)$ függvény csupán a szabálytalan alakú profilgörbe maximumpontjainak vízszintes irányú bevetítésével kapott (nem független elemű) statisztikai mintára támaszkodó relatív gyakoriság sűrűséghisztogram folytonossá tett változataként azonosítható.”

A méréssel meghatározott érdeség profil z magassága diszkrét valószínűségi változónak tekinthető, melynek lehetséges értékei véges számsorozatot alkotnak. A $\Phi(z)$ függvény a felületi érdeség mérés eredményeként előálló pontthalmazhoz (mért érdeségi profilhoz) tartozó relatív gyakoriság sűrűséghisztogram folytonossá tett változataként értelmezhető.

19, „A 4.4 képlettel meghatározott zéró és egy közé eső „szintmeghaladási arányszámot” csak szimbolikusan lehet valószínűségnek nevezni. Helyes marad azonban a 4.5 képlet, amennyiben azt a d távolodást meghaladó csúcsok közepes számaként értékeljük. Szigorúbb valószínűségi modellben mind n mind N valószínűségi változó lenne.”

Köszönöm az észrevételt.

20, „Jelölt a gömbfelületű érdeség és a sík érintkezésekor értelmezett δ gömbsüveg magasságot a $\delta \approx a^2/R$ közelítő formulával számolja. Mint azt Sitkei György akadémikus nemrég (2017) kimutatta, valójában ez jelentős hibát hoz be a pontos $\delta = R(1 - \sqrt{1 - (a/R)^2})$ értékhez képest. Ebből következően az összes olyan formula, amely a $\delta = a^2/R$ közelítéssel számol, elvileg pontatlan. Nem rovom fel a jelöltnek ezt, mert a szakirodalomban szinte mindenütt ezt a közelítést használják. Érdekes lenne a későbbiekben a különböző származtatott mennyiségekben keletkezett hiba feltárása.”

Köszönöm az észrevételt.

21, „Az 59. old. f. 19. sorban tett felismerés arra nézve, hogy jellegükben (alakjukat tekintve) eltérő sajátosságú véletlen függvény realizációk spektrális sűrűségfüggvénye megegyező is lehet, közismert a gyengén stacionárius sztochasztikus folyamatok elméletében.”

Köszönöm az észrevételt. Mindazonáltal a Bíráló által említett „felismerést” én inkább egy olyan megállapításnak szántam, amely felhívja az olvasó figyelmét a Bíráló által említett gyengén stacionárius, sztochasztikus folyamatok és a különböző megmunkálási módok által létrehozott mérnöki felületek méréssel meghatározott érdesség profiljai közötti kapcsolatra.

22, „Az 59. oldalon Jelölt a Salant-féle „sztochasztikusnak mondott” áramlási és súrlódási modelljét (mixed friction model) veszi tekintetbe a kenőanyag és a szabálytalan felületprofilok közötti részben kialakuló folyadékáramlás dinamikai vizsgálatára. A dinamikai elemzés a siklócsapágyak elméletében is használt Reynolds-féle differenciálegyenletre támaszkodik. Az általános egyenletből kiindulva Jelölt által tekintetbe vett egyenlet a Müller-féle egyszerűsítésekkel dolgozik, előnyére írandó azonban, hogy az áramló (vonszolt) folyadékot exponenciálisan nyomásfüggő viszkozitásúként veszi figyelembe.”

Köszönöm az észrevételt.

23, „A Reynolds egyenlet alkalmazását a 60. old. második bekezdésében tett a és b, továbbá a d, ..., k közelítő feltételezések nem kifogásolhatók, azonban kérdéses pontként merül fel, hogy a „c” feltételezés szerint a kiinduló egyenlet merev falak esetén érvényes. Ehhez képest a későbbi numerikus vizsgálat deformálódó határoló alakzatot is kezel.”

A kenéstechnikai feladat megoldása a deformálódó határoló alakzat rugalmas deformációja miatt iterációt igényel. A deformálódó határoló alakzat rugalmas deformációjának számítása végeselem módszerrel meghatározott hatásmátrix alkalmazásával történt.

24, „Ha a későbbiekben vizsgált dugattyúrúd mozog a tömítéssel fennálló súrlódó kapcsolatban, akkor ezen a folyamat során kialakuló részáramlás stacionaritása aggályos, kérdésessé válik a (4.18) egyenletből a (4.19) egyenletre való áttérés lépésének jogossága.”

Az ideálisan simának tekintett dugattyúrúd és az álló érdes ellenfelület érintkezését az utóbbihoz rögzített koordinátarendszerben vizsgáltam, miközben a dugattyúrúd sebességét a teljes löket során állandónak tekintettem. Ezen feltételek tették lehetővé az állandósult állapotbeli Reynolds egyenlet használatát.

25, „A Reynolds egyenlet kezelésénél közepes (átlagos) mennyiségek bevezetésével a Jelölt eljut a (4.22) differenciálegyenlethez, amit „fi” általános koordinátára és az „F” kavitációs indexre iterációval old meg. Az így kialakított iterációval kezelni tudja a kialakuló rugalmas (elasztikus) deformáció folyamatát. A rugalmas deformáció számítására a behatási együttható mátrix (influence coefficient matrix) módszerét alkalmazza. Az elméleti végeredmény a szivárgási mennyiség [(4.25) egyenlet] számítására szolgáló képlet a tömítések tervezésében felhasználható.”

Köszönöm az észrevételt.

26, „A kavitáció folyamatának követésében a jelölt meglehetősen visszafogottan jár el, mert be kellett volna mutatnia a folyadéktérbeli nyomás változását az x koordinátatengely mentén. Így vélhetően jobban kidomborodott volna, hogy ha a folyamatban valahol a kenőanyag (vagy más folyadék) telítési gőznyomása alatti nyomású szakasz után pl. az áramlási keresztmetszet lokális megnövekedése miatt elég hamar, elég nagy nyomású zóna következik, akkor jön a kavitáció (a nagysebességű és kisnyomású térrészben létrejött gőzbuborékok összeomlása).”

Köszönöm az észrevételt. A kavitáció folyamatának megértését azzal igyekeztem elősegíteni, hogy a 4.5.4-4.5.6 alfejezetekben ismertetett verifikációs feladatok eredményei között a folyadék térbeli nyomás x koordinátatengely menti változását is feltüntettem.

27, „A kavitációból kiinduló további hatások (pl. nyomáshullámok) vizsgálatára a jelölt nem tér ki. Igazából az olvasó nem kap információt arra nézve, hogy a vizsgált tribológiai rendszerben a következményei miatt fontos kérdés-e a kavitáció, vagy csak érdekes jelenség?”

A vizsgált tribológiai rendszerben a kavitáció modellezése arra szolgál, hogy azonosítani tudjuk a névleges érintkezési tartomány azon részeit, ahol az érintkező felületek között alakulhat ki teherbíró képességgel rendelkező kenőfilm. A kavitációból kiinduló nyomáshullámok vizsgálatával valóban nem foglalkoztam.

28, „A 4.41 ábrán közölt blokkvázlat nem ad könnyű áttekintést a Jelölt által kidolgozott algoritmus és a program tényleges működéséről.”

Valóban nem könnyű az algoritmus működését áttekinteni a blokkvázlat alapján. Ugyanakkor a bemutatott blokkvázlat nem kelt hamis illúziót az olvasóban a számítási algoritmus összetettségével kapcsolatban. Magam részéről, gondolva az algoritmus fejlesztésre vállalkozó kutatókra, egy részletes blokkvázlat elkészítését láttam jobbnak.

29, „Kérdés merül fel, hogy a 64.old. a. 4. sorában a „shear stress due to contacting particles” kifejezés valójában az érdességek érintkezésekor kialakuló szokásos csúszósúrlódásos érintkezésbeli felületi trakciót jelenti-e?”

A dolgozatban szereplő „shear stress due to contacting asperities” kifejezés a szilárd test érintkezés során kialakuló felületi trakciót jelöli.

30, „Elírásként azonosítható a 4.44. ábrán a függőleges tengelyre a térfogatáramra felírt mm²/s mértékegység. Ez a probléma ismét felmerül a 79. old. f. 14 sorában.”

Nem elírásról van szó, ugyanis a függőleges tengelyen nem a térfogatáram, hanem a térfogatáram dugattyúrúd kerületével elosztott értéke (egységnyi dugattyúrúd kerületre vonatkozó térfogatáram) szerepel.

31, „A 82. oldalon az 5. Fejezet első bekezdésének negyedik sorában a compliant szó aggályos a jelenség magyarázatához. Valóban a golyók merev testek, de az érintkezési tartományban rugalmas és disszipatív (nemlineáris) visszatérítő erőt képesek kifejteni. A compliance szó „frekvenciafüggő rugóállandó” jelentéssel szokott feltűnni az angol nyelvű szakirodalomban.”

A „compliant contact” kifejezés széles körben használt a szakirodalomban az olyan érintkezési modellek esetén, ahol az érintkező testeket geometriailag ideálisan merevnek tekintjük, de megengedjük, hogy a testek között átfedés alakulhasson ki. Az átfedés következtében átfedéssel arányos, véges nagyságú normál erő lép fel az érintkezésben lévő testek között.

32, „A 82. old. a. 9. sorbeli collision szóval kapcsolatba kérdés, hogy az eljárásban valóban (megfelelő ütközési tényezővel számított) ütközési (collision) impulzuscserre valósul-e meg a kölcsönható falak és részecskék között a geometriai érintkezés létrejötte indikálásának

pillanatában, és innen új kezdeti feltételek mellett folytatódik a tömegek mozgásegyenleteinek az integrálása? Vagy inkább az érintkezésbe lépő gömbfelületek átmetsződési mélységének mértékével függvénykapcsolatban álló mértékű normális irányú, a mozgásállapottól nemlineárisan függő rugalmas és disszipatív visszatérítő erő, valamint a csúszási viszonyoknak megfelelő tangenciális súrlódóerő kerül bevezetésre a gömbök kerületén?”

A testek közti érintkezés több időlépésen keresztül tart. Az érintkezés során a pillanatnyi átfedés mértékével függvénykapcsolatban álló mértékű normális irányú, valamint a csúszási viszonyoknak megfelelő, tangenciális súrlódási erő kerül bevezetésre.

33, „*A gömböcskék mozgása milyen koordinátarendszerben került leírásra? Hol van az $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ alap bázisa a 3 dimenziós euklidészi térnek, amelynek térgörbái mentén a gömböcskék középpontjai mozognak? Feltehetően minden gömb középponthez helyvektor mutat. Minden helyvektorhoz, mint tárgyvektorhoz képvaktorként hozzá kell rendelődnie a gömböcske (haladási és forgási) sebességállapot vektorainak, valamint a rá ható eredő erő és eredő nyomaték vektorának, valamely $\mathbf{f} : R^3 \rightarrow R^{12}$ vektor-vektor függvénykapcsolat szerint. Van-e formalizálható felírása a fenti $\mathbf{f}$ vektorfüggvénynek?”*

A gömbök mozgása jobbsodrású, derékszögű Descartes-féle koordináta rendszerben került leírásra, melynek koordináta tengelyeit az 5.6 ábrán látható, három lapjával szomszédos cellákhoz kapcsolódó cella takart élei azonosítják. Minden gömb középpontjához helyvektor mutat. A gömbök pillanatnyi sebességállapota a gömbök szögsebességével és a gömbök középpontjainak sebességével került megadásra. A közvetlen bírálói kérdésre válaszolva, nincs tudomásom arról, hogy a gömbök helyvektoraihoz a Bíráló által említett vektorokat hozzárendelő vektor-vektor függvénynek lenne formalizálható felírása.

34, „*A 83. oldalon az (5.2) vektoregyenlettel kapcsolatban elegendő lehet a Θ tehetetlenségi nyomaték mátrixról beszélni, hiszen a bázis rögzített.*”

Merev test, álló pontra számított kinetikai nyomaték vektora egyenlő a test, álló pontra számított perdületének idő szerinti deriváltjával. Ennek megfelelően a dinamika alaptörvénye úgy is írható, hogy a test, álló pontra számított perdületének idő szerinti deriváltja egyenlő a testre ható erők álló pontra számított teljes nyomatékával. Ha a vonatkoztatási rendszert a gömb alakú részecske súlypontjához rögzítjük, akkor a perdület derivált számítására vonatkozó Euler-formula az (5.2) vektoregyenlet bal oldalának megfelelő alakban írható fel. Ekkor a gömb alakú részecske tehetetlenségi nyomaték mátrixa

$$\theta = \begin{bmatrix} \frac{2}{5}mr^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{5}mr^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{5}mr^2 \end{bmatrix}$$

alakban írható, ahol r a gömb sugarát, míg m a tömegét jelöli.

35, „*A 83. old. f. 18. sorában említett emlékezettől bíró tulajdonság (history dependency) nem lehet hosszú távú, talán csak éppen az előző szimulációs lépésbeli mozgásállapottól és súrlódási állapotától való függés lép be?”*

Az említett emlékezettől bíró tulajdonság megvilágítása érdekében meg kell vizsgálni az érintkezésnél fellépő tangenciális erő számítására használt összefüggést. A tangenciális erő

számításánál bevezetésre került egy virtuális rugó (Cundall rugó [79]), melynek megnyúlását az (5.8) egyenlettel számítottam. A számítási összefüggés értelmében az adott időlépéshez tartozó megnyúlás növekmény hozzáadódik a vizsgált érintkezés kialakulása óta eltelt időlépések alatt felhalmozott megnyúláshoz. A tangenciális erő pillanatnyi értékének számítását, a teljes megnyúlás ismeretében, az (5.7) összefüggés segítségével végeztem el. A számítási eljárásból látszik, hogy a virtuális rugó megnyúlása mindaddig halmozódik, amíg a vizsgált érintkezés meg nem szűnik. Az érintkezés kialakulása és megszűnése között rendszerint több időlépésnek megfelelő idő telik el, miközben a megnyúlás folyamatosan halmozódik.

36, „Lehet-e valamilyen egyszerű fizikai/fenomenológiai megokolást adni a 88. oldal (5.6) kifejezésében a jobb oldal második tagjában fellépő négyzetgyökös ξ_n -függésre nézve?”

Az (5.6) összefüggés első tagja a Hertz-elméletből származó érintkező felületeket egymástól eltávolítani igyekvő erőt (gömbök deformációjától függő rugalmas rész), második tagja pedig az energia disszipációt kifejező erőt (gömbök deformációjának sebességétől függő viszkózus rész) adja meg. Ennek megfelelően a modell egy disszipatív Hertz-féle érintkezést definiál.

A Hertz-elmélet (rugalmas érintkezés) által használt, kvázistatikus közelítés értelmében az időfüggő alakváltozás és az időfüggő feszültség között ugyanolyan kapcsolat áll fenn, mint statikus esetben. Viszkoelasztikus testek ütközése során fellépő normál erő modellezéséhez olyan számítási összefüggésre van szükségünk, amely legalább egy rugalmas és egy viszkózus viselkedésre jellemző erő összetevőből áll. Ennek megfelelően tételezzük fel, hogy 1D-s esetben (-x irányban mozgó, merev síkkal ütköző, viszkoelasztikus befogott rúd, ahol a rúd hossz tengelye egybeesik a koordinátarendszer pozitív x tengelyével. A koordinátarendszer origója legyen a befogás helyén.) a feszültség egy rugalmas és egy viszkózus részből áll. Ennek megfelelően

$$\sigma = \sigma_{rug} + \sigma_{visz},$$

ahol $\sigma_{rug} = E \frac{\partial u}{\partial x}$ és $\sigma_{visz} = \eta \frac{\partial}{\partial t} u$. Az összefüggésekben $u(x,t)$ az elmozdulásmezőt, az $\dot{u}$ az elmozdulásmező idő szerinti deriváltját, E és η pedig az anyag rugalmas és viszkózus természetére jellemző anyagállandókat jelöli. Rugalmas esetben, a mozgó sík és a viszkoelasztikus rúd között kialakuló ξ_n virtuális átfedés (viszkoelasztikus rúd deformációja) teljesen meghatározza az u elmozdulásmezőt. Ennek értelmében, a rugalmas (statikus) esetben kialakuló elmozdulásmező a ξ_n deformáció függvénye ($u_{rug}(x, \xi_n)$). Az elmozdulásmező idő szerinti deriváltjára alkalmazott kvázistatikus közelítés (Kvázistatikus esetben az elmozdulásmező a rugalmas/statikus feladat mezőjével közelíthető.) értelmében

$$\dot{u}(x,t) = \dot{u} \approx \dot{\xi}_n \frac{\partial}{\partial \xi_n} u_{rug}(x, \xi_n).$$

Ennek felhasználásával a feszültség rugalmas és viszkózus összetevőjét az alábbi formában is felírhatjuk:

$$\sigma_{rug} = E \frac{\partial u_{rug}}{\partial x},$$

$$\sigma_{visz} = \dot{\xi}_n \frac{\partial}{\partial \xi_n} \eta \frac{\partial u_{rug}}{\partial x}.$$

A két összefüggésből jól látszik, hogy $\sigma_{rug} \sim \frac{\partial u_{rug}}{\partial \kappa}$ és $\sigma_{visz} \sim \dot{\xi}_n \frac{\partial}{\partial \xi_n} \frac{\partial u_{rug}}{\partial \kappa}$. A Hertz-féle összefüggés értelmében, az ütközés során fellépő normál erő rugalmas összetevőjének abszolút értéke

$$F_{n,rug} = k_n \xi_n^{3/2}$$

alakban írható (lásd (5.6) egyenlet jobb oldalának első tagja). Ebből látszik, hogy $F_{n,rug} \sim \xi_n^{3/2}$. Kihasználva a feszültség összetevőkre vonatkozó fenti megállapítást

$$F_{n,visz} \sim \dot{\xi}_n \frac{\partial}{\partial \xi_n} (\xi_n^{3/2}) = \dot{\xi}_n \frac{3}{2} \xi_n^{1/2} = \frac{3}{2} \xi_n^{1/2} v_n,$$

ahol $v_n = \dot{\xi}_n$.

37, „A 89. oldalon szereplő (5.9) képletbeli kifejezés nem jellemzi helyesen a tangenciális kapcsolatban átvendő súrlódóerőt. Az alábbi képlet a helyes:

$$F_t = \max \{0, \min(F_t^*, -\text{sign}(v_t) \mu |F_n|)\} + \min \{0, \max(F_t^*, -\text{sign}(v_t) \mu |F_n|)\} \quad ,$$

Köszönöm az észrevételt. A kifogásolt egyenlet

$$F_t = \min(F_t^*, -\text{sgn}(v_t) \mu |F_n|)$$

helyes alakja a következő:

$$F_t = \min(|F_t^*|, \mu |F_n|) \cdot -\text{sign}(v_t).$$

38, „Lehet-e valamilyen egyszerű fizikai/fenomenológiai megokolást adni a 88. oldal (5.10) kifejezés szerkezetére és konstans együtthatójára nézve?”

Az (5.10) kifejezés az 54. oldal f. 8. sorában hivatkozott Hertz-féle összefüggésből adódik, amennyiben $\delta = \xi_n$, $F_N = F_n$, $R = R_{eff}$ és $E' = E_{eff}$ helyettesítéseket elvégezzük.

39, „Az 5.18 és az 5.24 ábra aláírásban fontos korrigálni, mert a szögsebesség SI mértékegység: **rad/s**.”

Köszönöm az észrevételt. Az említett ábrák esetén valóban [rad/s]-nak kellene szerepelnie [1/s] helyett.

40, „Lehet-e valamilyen kijelentést tenni a surrantó kiömlési keresztmetszetének környezetében megvalósuló részecskeáramlás sebességterének forgásosságáról?”

A témával kapcsolatos kutatómunkám nem terjedt ki a sebességtér forgásosságának vizsgálatára. A sebességtér forgásosságának vizsgálatához szükséges részletes szimulációs eredmények kinyerése és tárolása érdekében meg kellene ismételni a szimulációkat. Jelenleg a sebességtérrel kapcsolatban csak néhány, dolgozatban is bemutatott pillanatfelvétel áll rendelkezésemre, de az ábrák mögött álló számítási eredmények már nem kerültek elmentésre/tárolásra.

Végezetül, szeretném még egyszer megköszönni Dr. Zobory István minden részletre kiterjedő bírálatát és tisztelettel kérem a bírálatban megfogalmazott kérdésekre adott válaszaim elfogadását.

Budapest, 2017. május 4.

Tisztelettel:

Dr. Goda Tibor János
egyetemi docens